

**А. А. Филатов\*, А. В. Суздальцев, Ю. П. Зайков**

Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, г. Екатеринбург

\*fill.romantic@yandex.ru

Научный руководитель — проф., д-р хим. наук Ю. П. Зайков

## **ВЛИЯНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СПЛАВОВ И ЛИГАТУР Al–Zr**

В данной работе изучено влияние содержания циркония в алюминии на его коррозионную стойкость в растворе NaCl. Методом сканирующей электронной микроскопии изучена структура сплавов и лигатур Al–Zr. Установлено, что однородные сплавы менее склонны к коррозии, чем лигатуры с интерметаллидными включениями. При этом наиболее активно разрушается лигатура с содержанием 5,5 мас. % циркония, при повышении содержания циркония до 10 мас. % и выше скорость коррозии снижается.

*Ключевые слова:* цирконий, алюминий, коррозия, сплав, лигатура.

**A. A. Filatov, A. V. Suzdaltsev, Y. P. Zaikov**

## **EFFECT OF INTERMETALLIC COMPOUNDS ON THE CORROSION OF Al–Zr ALLOYS AND MASTER ALLOYS**

The effect of zirconium content in aluminium on its corrosion resistance in NaCl water solution was studied. Scanning electron microscopy was used to study the structure of Al–Zr alloys and master alloys. It is established that homogeneous alloys are less prone to corrosion than master alloys with intermetallic inclusions. The most actively destroyed master alloy with a content of 5.5 wt. % zirconium, with zirconium content above 10 wt. % corrosion rate is reduced.

*Key words:* zirconium, aluminum, corrosion, alloy, master alloy.

**В** настоящее время сплавы Al–Zr все чаще применяют в аэрокосмической отрасли и авиастроении благодаря их малой плотности, высокой прочности и коррозионной стойкости. При введении 0,02–0,05 мас. % Zr в алюминий возрастают прочность, коррозионная стойкость и термоустойчивость сплава [1]. Поскольку лигатура является сырьем при производстве сплавов, к ней предъявляется ряд требований, в частности высокая коррозионная стойкость, необходимая для длительного хранения лигатуры [2]. Лигатуры Al–Zr получают механическим

смешением Zr с жидким или порошкообразным Al, а также алюминио-термическим восстановлением солей Zr [2, 3], однако наиболее перспективным с технико-экономической точки зрения является получение лигатур при электролизе расплавов [4], что в свою очередь сопровождается образованием интерметаллидных соединений, влияние которых на коррозионную стойкость сплавов и лигатур на данный момент не изучено.

В данной работе было изучено влияние содержания Zr и наличия интерметаллидных соединений на коррозионную стойкость сплавов и лигатур Al–Zr в растворе NaCl при комнатной температуре.

Для проведения коррозионных испытаний электролитически были получены лигатуры во фторидных расплавах [4]. Элементный состав полученных лигатур определяли спектрально-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой и рентгенофазовым анализом с использованием спектрометра iCAP 6300 Duo (Thermo scientific, США) и дифрактометра Rigaku D/MAX-2200VL/PC (Rigaku, Япония). Структуру и распределение Zr в образцах анализировали на сканирующем электронном микроскопе JMS-5900LV (JEOL, Великобритания) (SEM- и EDX-анализы). Для этого из отливок изготавливали шлифы при помощи режущего и шлифовального оборудования (Struers, Дания). Из каждого образца было изготовлено по пять пластин размерами  $10 \times 20 \times 1,5$  мм. Все образцы были обработаны по ГОСТ 9.907–2007, высушены и взвешены на аналитических весах. Четыре пластины с одинаковым содержанием циркония помещены в отдельные стаканы с раствором NaCl на 3, 7, 14 и 28 суток при комнатной температуре.

По истечении времени выдержки образцы были изъяты из раствора, протравлены раствором щелочи для удаления продуктов коррозии, промыты дистиллированной водой, высушены и взвешены.

На рис. 1 представлены фотографии образцов после коррозионных испытаний. АВЧ и сплав с содержанием 0,42 мас. % Zr практически не подверглись коррозии, в то время как на остальных сплавах отчетливо наблюдаются следы коррозионного разрушения.

На рис. 2 представлены зависимости показателей скорости коррозии от содержания Zr в сплаве. Первые точки на графике показывают степень коррозии АВЧ после различной длительности выдержки. Исходя из полученных графиков было установлено, что сплав с 0,42 мас. % Zr наиболее устойчив к коррозии, при этом на третий день испытаний активнее всех разрушается лигатура с содержанием 10 мас. % Zr.

Чтобы объяснить наблюдаемое явление, было более подробно изучено влияние структуры образцов и наличия интерметаллидных соединений на их коррозионное поведение.

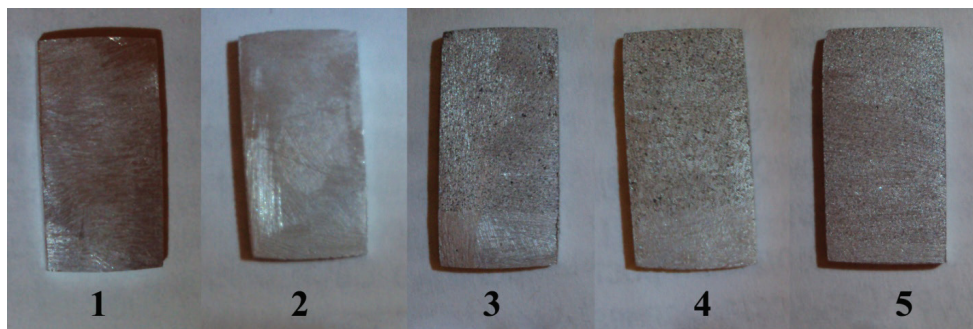


Рис. 1. Фотографии образцов после 28 дней коррозионных испытаний (мас. % Zr):  
1 – АВЧ; 2 – 0,42; 3 – 5,5; 4 – 10; 5 – 11

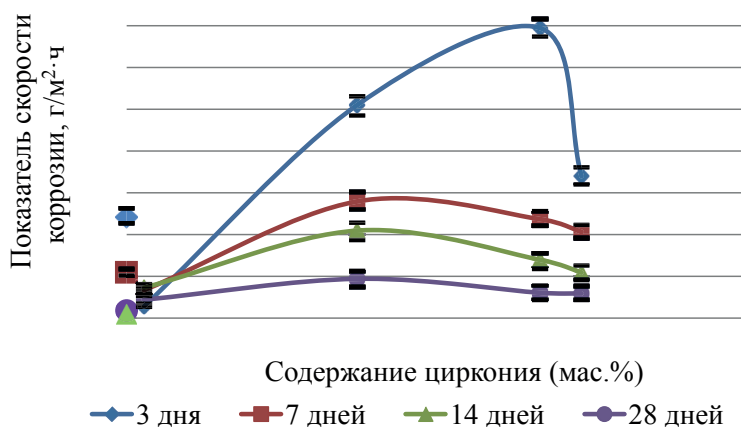


Рис. 2. Зависимость показателя скорости коррозии от содержания циркония в сплаве

Методом сканирующей электронной микроскопии было установлено, что сплав с 0,42 мас. % Zr является гомогенным, в то время как лигатуры с содержанием 5,5; 10 и 11 мас. % Zr содержат интерметаллидные соединения (ИМС) (рис. 3) преимущественно состава  $\text{Al}_3\text{Zr}$  согласно результатам рентгенофазового анализа [4].

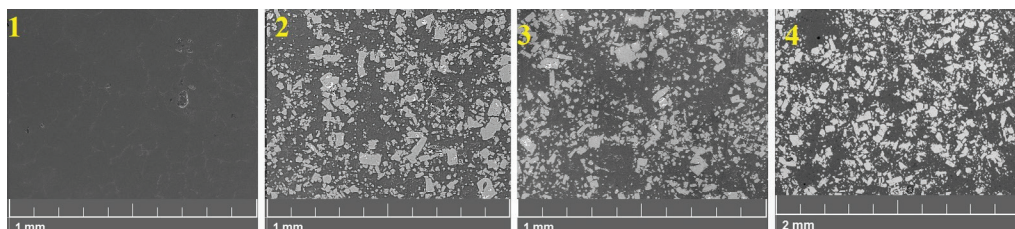


Рис. 3. Структура исследуемых сплавов:  
1 – 0,42 мас. % Zr; 2 – 5,5 мас. % Zr; 3 – 10 мас. % Zr; 4 – 11 мас. % Zr

Согласно данным [5] большинство включений ИМС являются катодными участками по отношению к алюминиевой основе, что приводит к коррозии алюминиевой основы в результате действия возникающих гальванопар.

На основании полученных данных было сделано заключение, что высокая коррозионная стойкость сплава с содержанием 0,42 мас. % Zr связана с его однородностью. Такое содержание Zr в Al позволяет ему проявлять модифицирующие свойства, что согласуется с данными [1], не вызывая при этом образования ИМС и коррозионных гальванопар. При содержании 5,5 мас. % Zr образующиеся ИМС будут занимать площадь, необходимую для создания максимально высокой плотности коррозионного тока, что приводит к достижению максимальной степени коррозии. Снижение скорости коррозии при содержании выше 10 мас. % Zr предположительно связано с пассивацией образцов.

В ходе эксперимента установлено, что сплав с содержанием 0,42 мас. % циркония обладает максимальной коррозионной стойкостью благодаря своей однородной структуре. Среди лигатур Al–Zr, содержащих ИМС, наибольшей коррозионной стойкостью обладают лигатуры с содержанием циркония выше 10 мас. %.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Миронов В. М., Вышкварко Г. С., Китари Г. Г. Производство лигатур для алюминиевых и магниевых сплавов. М. ; Ленинград, 1936. 84 с.
- 2 Напалков В. И., Махов С. В. Легирование и модифицирование алюминия и магния. М. : МИСИС, 2002. 375 с.
- 3 Огородов Д. В., Попов Д. А., Трапезников А. В. Способы получения лигатуры Al–Zr (обзор) // Труды ВИАМ. 2015. С. 882–893.
- 4 Получение сплавов и лигатур Al–Zr при электролизе расплавов  $KF-NaF-AlF_3-ZrO_2$  / А. А. Филатов [и др.] // Цветные металлы. 2017. № 11. С. 27–31.
- 5 Wang X., Wang J., Fu C. Characterization of pitting corrosion of 7A60 aluminum alloy by EN and EIS techniques // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2014. 24. С. 3907–3916.